



5 Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung zum anisotropen Ätzen von Substraten mittels eines Plasmas.

Das Ätzen von Substraten mittels eines Plasmas ist bekannt. Es findet vor allem Verwendung bei Substraten aus Silizium für die Halbleitertechnik, insbesondere bei der Herstellung von Chips aus Siliziumwafern. Dabei werden durch Ätzmasken definierte Strukturen, wie zum Beispiel Vertiefungen, in das Substrat eingätzt. Bei den Ätzmasken handelt es sich um auf die Oberfläche der Substrate aufgebrachte Maskierschichten, beispielsweise Photolackschichten. Das Plasma wird durch Anregung von reaktiven Gasen beziehungsweise Gasgemischen mittels hochfrequenter elektromagnetischer Strahlung gezündet. Dazu verwendet man beispielsweise eine induktiv gekoppelte Plasmaquelle (ICP = inductive coupled plasma) mit Hochfrequenzanregung. Eine typische ICP-Quelle weist eine um das Plasmavolumen gelegte Anregungsspule mit einer oder mehreren Windungen auf, die zur Plasmaanregung von einem hochfrequenten Strom, zum Beispiel der Frequenz 13,56 MHz durchflossen wird. Ein Ende der Spule (das sogenannte "heiße Ende") ist demnach mit einer Hochfrequenzquelle verbunden.

Ein gattungsgemäßes Ätzverfahren zum Siliziumtiefenätzen mit einer ICP-Quelle ist aus der DE 42 41 045 C1 bekannt.

Das Wechselfeld beziehungsweise Magnetfeld der Anregungsspule ist aber inhomogen. Diese Inhomogenität bewirkt am Rand des Plasmas im Vergleich zur Mitte eine Erhöhung der Menge an Ionen und Reaktivteilchen. Aufgrund dieser Anregungsgeometrie beobachtet man eine unterschiedliche Ätzrate im Zentrum und am Rand des Substrates. Die Ätzrate kann beispielsweise in der Mitte eines Wafers mit einem Durchmesser von 150 mm bis zu 20% geringer sein als am Randbereich des Substrats.

Ferner führen die von dem auf hoher Spannung liegenden "heißen" Spulenende ausgehenden elektrischen Streufelder zu einer entsprechend starken Deformation des induktiven Plasmas. Gleichzeitig wird das Plasma aus dem Zentrum der Anregungsspule zum "heißen" Spulenende hin verschoben. Dementsprechend ist auch der Abtrag der Ätzmaste sehr ungleichmäßig und vom Zentrum des Substrats zum Randbereich hin verschoben. In dem Bereich des Substrats, das dem auf hoher Spannung liegenden Ende der Anregungsspule in der Plasmaquelle benachbart ist, ist der Abtrag geringer als in den vom "heißen" Spulenende entfernteren Bereichen des Substrats. Aus diesen Inhomogenitäten resultieren Ungenauigkeiten der eingätzten Strukturen.

Aus der DE 40 16 765 A1 ist eine Vorrichtung zur Beschichtung ausgedehnter Substrate bekannt, bei der das Substrat unterhalb einer Blendenöffnung bewegt wird, um eine definierte Beschichtung von großflächigen Substraten mit uniformen Schichten zu erhalten. Eine Plasmabeschichtung des Substrats wird durch eine Relativbewegung von Blendenöffnung zu dem Substrat erreicht, wobei ein Durchmesser der Blendenöffnung sehr viel kleiner ausgebildet ist als eine Oberflächenstreckung des zu behandelnden Substrats.

Ferner sind aus der JP 04/9473 A und JP 04/154971 A Plasmabehandlungsanlagen bekannt, bei denen das Plasma durch eine Lochblende geführt wird. Die Lochblenden werden jeweils durch eine, eine Öffnung aufweisende Scheibe gebildet, die zwischen der Plasmaquelle und dem zu behandelnden Substrat angeordnet ist.

#### Vorteile der Erfindung

40 Die erfindungsgemäße Vorrichtung mit den im Anspruch 1 genannten Merkmalen bietet den Vorteil, daß in einfacher Weise Inhomogenitäten eines Plasmas und hieraus resultierende Inhomogenitäten einer Ätzrate minimiert werden können. Dadurch, daß der Apertur wenigstens eine wirksame Oberfläche zur Elektronen-/Ionen-Rekombination zugeordnet ist, wobei die wirksame Oberfläche als etwa zylindrischer Aufsatz auf der Apertur ausgebildet ist, und der Durchmesser der Apertur größer als der Durchmesser des Substrats ist, läßt sich eine Inhomogenität der Ätzrate mindestens halbieren. Gleichzeitig wird der unregelmäßige Abtrag der Ätzmaste nahezu vollständig unterdrückt. Dabei kann sogar eine leichte Überkompensierung beobachtet werden, das heißt, der Abtrag der Ätzmaste nimmt zum Substratrand hin leicht ab. Das Maskenprofil ist jetzt zentriert. Dieser Effekt ist deswegen besonders vorteilhaft, weil er es ermöglicht, den Photolack in geringeren Schichten aufzutragen. Damit gehen eine größere Genauigkeit der Strukturierung und eine Verringerung der herstellbaren Strukturweiten einher.

Die erfindungsgemäße Vorrichtung beruht auf der Erkenntnis, daß die oben beschriebenen Inhomogenitäten des Plasmas durch die erfindungsgemäße Vorrichtung vom Substrat ferngehalten werden. Die erfindungsgemäße Apertur bietet eine Vergrößerung der für die Elektronen-/Ionen-Rekombination wirksamen Fläche. Während der Akzeptanzwinkel zum Substrat hin verkleinert wird. Durch Expansion des Plasmas unterhalb der Apertur zum Substrat hin tritt eine Verdünnung der reaktiven Teilchen, also sowohl der Ionen als auch der freien Radikale, ein, die besonders im Randbereich des Substrats wirksam wird.

Die Inhomogenität des hochfrequenten Spulenfeldes der Anregungsspule und der Einfluß der vom auf hoher Spannung liegenden Spulenende ausgehenden elektrischen Felder auf das Plasma werden also zum Substrat hin abgeschirmt. Die Kompensierung beruht auf einer Elektronen-/Ionen-Rekombination an den Wänden der Apertur, wodurch die Ionenstromdichte im Randbereich des Substrats abnimmt und auf einem Verdünnungseffekt, der ebenfalls im Randbereich des Substrats wirksam ist.

Die vorliegende Erfindung bewirkt also eine Verbesserung der Uniformität einer ICP-Quelle zum Substrat hin.

Durch die in den Unteransprüchen genannten Maßnahmen sind vorteilhafte Weiterbildungen und Verbesserungen der im Anspruch 1 genannten Vorrichtung möglich.

65 Eine bevorzugte Ausführungsform der erfindungsgemäßen Apertur besteht in einer Lochblende mit einer darauf aufgesetzten, etwa zylinderförmigen Röhre, die ins Plasma eingeführt wird. Die zylinderförmige Röhre bietet eine Vergrößerung der für die Elektronen-/Ionen-Rekombination wirksamen Fläche über eine verlängerte Laufstrecke der Elektronen bzw. Ionen in dem von dieser Rekombinationsfläche umschlossenen Volumen.

Durch das Beladen der Substratelektrode mit einem Absorber um den Rand des Substrats herum aus einem die jeweiligen Reaktivteilchen verbrauchenden Material kann zusätzlich eine über den Randbereich des Substrats sich erstreckende, reaktive Teilchen verbrauchende Substratlast simuliert werden. Damit kann eine weitere Ursache für den ungleichmäßigen Abtrag der Ätzmaske kompensiert werden. Im Randbereich des Substrats werden durch das Substrat selbst weniger reaktive Teilchen absorbiert als in der Mitte. Gleichzeitig werden aufgrund der Inhomogenität des Plasmas verstärkt reaktive Teilchen am Rand produziert. Die Konzentration der reaktiven Teilchen ist also im Randbereich des Substrats erhöht. Der Auffangschild absorbiert diesen Überschuss. Je nach den Abmessungen des Auffangschildes kann eine absolut homogene Ätzung über die Substratfläche erreicht oder die Ätzratenverteilung über die Substratfläche sogar invertiert werden (die Ätzrate nimmt zum Rand hin ab).

### Zeichnung

Im folgenden wird die Erfindung anhand eines Ausführungsbeispiels mit Bezug auf die Zeichnung näher erläutert. Es zeigen:

**Fig. 1** die Magnetfeldverteilung einer induktiv gekoppelten Plasmaquelle mit einer einzigen Spulenwindung; 15

**Fig. 2** eine schematische Darstellung einer Plasmabearbeitungsanlage mit einem Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Vorrichtung;

**Fig. 3** eine schematische Detailansicht der Apertur in **Fig. 2**;

**Fig. 4** eine schematische Draufsicht auf die Lochblende in **Fig. 3**.

**Fig. 1** zeigt den berechneten Amplitudenverlauf der Feldverteilung des Magnetfelds einer typischen ICP-Anregungsspule. Dabei handelt es sich um eine von einem hochfrequenten Strom durchflossene Spule mit einem Durchmesser von 40 cm und einer einzigen Windung. Diese Spule ist in einer kommerziellen Plasmaquelle für die Generierung eines hochfrequenten Magnetfelds zur induktiven Plasmaanregung enthalten. Diese Feldverteilung entspricht im wesentlichen der Plasmadichteverteilung des damit angeregten Plasmas. Unter Plasmadichteverteilung wird die Verteilung der Ionen- und der Dichte reaktiver Spezies, wie z. B. Radikale, verstanden. 20

In diese Verlaufskurve ist der Durchmesser  $d$  eines Silizium-Wafers mit einem Durchmesser von 150 mm (6"-Wafer) eingetragen, wobei das Feldminimum in den Wafer-Mittelpunkt gelegt ist. Diese Zentrosymmetrie entspricht dem Fall nicht vorhandener elektrischer Störfelder. Ohne Störfelder elektrischer Art ist also auch die Plasmadichteverteilung zentrosymmetrisch. 25

Man erkennt, daß die so berechnete Plasmadichte von der Mitte bis zum Rand des 6"-Silizium-Wafers um mehr als 12% ansteigt. Da die Beschleunigung der Ionen in Richtung auf das Substrat durch die Substratbiasspannung zu einer im wesentlichen gleichen Ionenstromdichte führt, ist die Ätzrate am Rand des Silizium-Wafers erheblich höher als in der Mitte. 30

**Fig. 2** zeigt schematisch eine Plasmabearbeitungsanlage **1**, in der eine erfindungsgemäße Vorrichtung **13** eingesetzt wird. Die Plasmabearbeitungsanlage **1** weist einen Reaktor **2** auf, in den über einen Zuführstutzen **3** ein im Ausführungsbeispiel fluorlieferndes reaktives Gas bzw. eine fluorliefernde reaktive Gasmischung geleitet werden kann. Über einen Absaugstutzen **4** mit einem Regelventil **5** kann der gewünschte Druck im Reaktor **2** eingestellt werden. 35

Ferner ist eine Hochspannungs-Plasmaquelle mit einer ICP-Spule **6** zur Generierung eines hochdichten Plasmas **8** vorgesehen. Die Einkopplung des durch die Spule **6** erzeugten hochfrequenten Magnetfelds in den mit reaktivem Gas beschickten Reaktor **2** führt zur Zündung des Plasmas **8**. Das Substrat **9**, in diesem Fall ein 6"-Silizium-Wafer, befindet sich auf der Substratelektrode **10**, welche mit einer weiteren Hochfrequenz-Spannungsquelle verbunden ist. 40

Zur Homogenisierung der Plasmadichteverteilung bzw. der Ionenstromdichte wurde im Ausführungsbeispiel die in den **Fig. 3** und **4** schematisch dargestellte erfindungsgemäße Apertur **13** zwischen die induktive Plasmaquelle und das Substrat **9** eingesetzt. Die Apertur **13** dient dazu, die intensiven Randanteile des Plasmas auszublenden und gleichzeitig elektrische Streufelder vom Substrat **9** fernzuhalten. Die Apertur **13** weist eine Lochblende **14** auf, die z. B. aus 15 mm dickem Aluminium gefertigt werden kann. **Fig. 4** zeigt die Blendengeometrie. Die Befestigung der Lochblende **13** in der Vorrichtung **1** erfolgt z. B. an einem Flanschteil (nicht dargestellt). Der Durchmesser der Öffnung **15** der Lochblende **14** ist größer als der Durchmesser  $d$  des Wafers **9**. Im Ausführungsbeispiel betrug die Blendengröße 170 mm für einen Durchmesser des Wafers **9** von 150 mm (6"-Wafer). 45

Zur Vervollständigung der erfindungsgemäßen Vorrichtung **13** wurde ein Schirm **16** in Form eines vertikalen Zylinders, bspw. aus Aluminium mit einer Wandstärke von 10 mm, in die Anlage **1** eingefügt. Der Zylinder **16** kann am Rand der Lochblende **14** fixiert, aber auch separat befestigt sein. Es wurden Zylinder **13** mit einer Höhe von 70 mm, 49 mm und 25 mm erprobt. 50

Auf der Substratelektrode **10** wurde ferner ein Absorber **17** installiert, der thermisch gut an die Substratelektrode angekoppelt ist (z. B. mit Vakuumfett). Das Material des Absorbers **17** ist so gewählt, daß die jeweiligen reaktiven Teilchen absorbiert und damit verbraucht werden. Im vorliegenden Fall können zur Absorption von Fluor Silizium oder Graphit (Kohlenstoff) eingesetzt werden. Für andere reaktive Teilchen können auch Quarzglas oder Kunststoffe geeignet sein. 55

Als optimal erwies sich eine Zylinderhöhe von 25 mm sowohl hinsichtlich der Uniformität der Ätzrate als auch für den Silizium- bzw. den Ätzmaskenabtrag. Höhere Zylinder führten zu einer deutlichen Abnahme des Ätzmaskenabtrags zum Waferrand hin, so daß die Ionenstromdichte im Randbereich des Wafers zu stark reduziert wurde (Überkompensation). 60

Als Gegenprobe wurde der Zylinder **16** entfernt, und einfache Lochblenden **14** mit verschiedenen Durchmessern wurden erprobt. Die eingesetzten Durchmesser waren 70 mm, 110 mm, 130 mm, 150 mm und 170 mm.

Bei den Blendendurchmessern bis 150 mm, die kleiner als der Substratdurchmesser waren, zeigten die Ätzprofile eine nicht tolerierbare Verkipfung aus der Vertikalen in Richtung auf das Blendeninnere, d. h. die geätzten Gräben waren schräg – unter einem Winkel  $\neq 90^\circ$ , ins Substrat eingeeätzt. Mit einer Vergrößerung der Blendenöffnung konnte dieser schädliche Effekt verringert werden, bis er bei einer den Substratdurchmesser übersteigenden Blendenöffnung ganz verschwand. Mit einer solchen Blendenöffnung von im Ausführungsbeispiel 170 mm ließ sich jedoch die Ätzrate am Rand des Wafers **9** praktisch nicht mehr reduzieren. Die Lochblende **14** war also für diese Durchmesser wirkungslos. 65

Es ist also eine zusätzliche Fläche für die Elektronen-/Ionen-Rekombination, im Ausführungsbeispiel der Zylinder 16, erforderlich, der eine Uniformitätsverbesserung des Plasmas ohne den Effekt der Profilverkipfung im Randbereich des Substrats 9 ermöglicht. Damit bewirkt auch ein Blendendurchmesser, der größer als der Substratdurchmesser ist, eine Uniformitätsverbesserung des auf das Substrat 9 einwirkenden Plasmas, ohne Beeinträchtigung der Profilformen.

- 5 Die Ätzzatenverteilung kann mit der erfindungsgemäßen Blenden-Vorrichtung, abhängig von Art und Größe des Substrats und der Plasmaquelle, für alle Trenchweiten mindestens um den Faktor 2 verbessert werden. Bei Versuchen mit einem repräsentativen Testwafer-Typ mit und ohne Apertur 13 erhielt man die in den folgenden Tabellen aufgelisteten Ätzzatenverteilungen.

Bei allen Versuchen wurden 6"-Siliziumwafer 10 min lang geätzt. Die Ätzmaske aus Photoresistlack hatte zu Beginn der Behandlung in allen Fällen eine Dicke von 1,1 µm. Bei diesen Versuchen wurde um den Wafer herum ein Quarzauf-  
fangshield gelegt. Es fand also keine Absorption von Fluorradikalen im Randbereich des Wafers statt. Man beobachtet  
bei diesen Versuchen nur den Effekt der erfindungsgemäßen Apertur. Die Abweichung wurde aus der Differenz zwischen  
maximaler und minimaler Ätztiefe, dividiert durch die mittlere Ätztiefe, berechnet. Dies entspricht etwa dem doppelten  
Quotienten aus der Differenz zwischen maximaler und minimaler Ätztiefe und der Summe von maximaler und minima-  
ler Ätztiefe:

$$\% \text{ Abweichung} = \frac{(\text{max. Ätztiefe} - \text{min. Ätztiefe}) \cdot 100\%}{\text{mittlere Ätztiefe}}$$

$$\% \text{ Abweichung} = 2 \cdot \frac{\text{Max.} - \text{Min.}}{\text{Max.} + \text{Min.}}$$

Tabelle 1

Ätzung ohne Apertur

<u>Trenchweite</u>	<u>Abtrag</u> <u>Wafermitte</u>	<u>Max. Abtrag</u> <u>Waferrand</u>	<u>Abweichung</u>
2,2 µm	15,1 µm	17,3 µm	14 %
5,0 µm	17,5 µm	20,2 µm	15 %
60 µm	23,2 µm	27,0 µm	16 %

Tabelle 2

Ätzung mit Apertur, Lochblende ø 170 mm, Zylinderhöhe 25 mm

<u>Trenchweite</u>	<u>Abtrag</u> <u>Wafermitte</u>	<u>Max. Abtrag</u> <u>Waferrand</u>	<u>Abweichung</u>
2,2 µm	17,4 µm	18,7 µm	7,4 %
5,0 µm	19,6 µm	21,3 µm	8,7 %
60 µm	25,4 µm	27,0 µm	6,3 %

Man erkennt eine deutliche Verbesserung der Uniformität der Ätzrate um etwa einen Faktor 2, und zwar gleich für alle untersuchten Trenchweiten. Die Profile in den 60 µm breiten Trenches sind unter den gewählten Prozeßparametern exakt senkrecht, in den schmalen Trenchgräben tendenziell leicht positiv, d. h. die Trenchgräben verengen sich in die Tiefe minimal. Eine Profilverkipfung aus der Vertikalen ist nicht mehr zu erkennen. Selbstverständlich kann durch Parametervariation die gewünschte Profilform in der einen oder anderen Richtung beeinflusst werden.

Gleichzeitig beobachtet man, daß der Abtrag des Photoresistlacks der Ätzmaske sehr viel gleichmäßiger ist. Während ohne Apertur 13 zwischen der minimalen Abtragsrate im Zentrum des um 4 cm aus der Wafermitte heraus verschobenen "Auges" und der maximalen Abtragsrate am gegenüberliegenden Waferrand ein Faktor 2 liegt (70% bezogen auf den

mittleren Lackabtrag), weicht die Abtragsrate mit der Apertur **13** maximal 17,5%, im Durchschnitt sogar deutlich weniger ab, wobei das Lackprofil zur Wafermitte hin exakt zentriert ist. Die Restlackdicke wächst, während der Lackabtrag zum Waferrand hin tendenziell leicht abfällt.

Da der Lackabtragsmechanismus ein rein ioneninduziertes Ätzen ist, ist das Restlackprofil ein direktes Maß für die Verteilung der Ionenstromdichte zur Substratoberfläche hin. Der leichte Anstieg der Restlackdicke zum Randbereich des Substrats hin bedeutet also eine vollständige Kompensation bzw. sogar eine leichte Überkompensation der quellenbedingten Inhomogenität der Ionendichteverteilung.

Die Zentrierung und bessere Gleichmäßigkeit bewirken, daß die Selektivität des Prozesses gegenüber der Ätzmaske über die ganze Substratoberfläche hinweg besser ausgeschöpft werden kann. Außerdem wird die Genauigkeit der getrenchten Strukturen über die Substratoberfläche hinweg dramatisch verbessert. Da der aus dem Lackverlust resultierende Strukturverlust überall etwa gleich groß ist, kommt dieser Effekt der Chipausbeute zugute.

Das erfindungsgemäße Verfahren bzw. die erfindungsgemäße Vorrichtung sind also in der Lage, elektrostatisch eingekoppelte Streufelder aus dem Bereich des auf hoher Spannung liegenden Endes der Spule zum Substrat hin praktisch vollständig abzuschirmen und zusätzlich die Ionenstromdichte zu homogenisieren.

In einer zweiten Versuchsreihe wurde zusätzlich zur eingesetzten Apertur der Effekt des Absorbers **17** untersucht. Der Absorber **17** bestand im Ausführungsbeispiel aus Silizium. Zur Absorption reaktiver Fluorradikale ist aber z. B. auch Graphit geeignet. Die Prozeßparameter waren dieselben wie oben beschrieben. Zunächst wurde der Abfall der Ätzrate am Waferrand in Abhängigkeit von der Breite des Absorbers **17** untersucht.

Tabelle 3

Ätzratenunterschied Rand-Mitte in Abhängigkeit von der Breite des Absorbers **17**

Trenchweite	Breite 5cm	Breite 2,5cm	Breite 1cm
2,2 $\mu\text{m}$	- 16,8 %	- 11,5 %	- 3,6 %
5,0 $\mu\text{m}$	- 15,7 %	- 10,8 %	- 4,4 %
60 $\mu\text{m}$	- 20,8 %	- 13,8 %	- 6,7 %

Dieser Effekt der Ätzratenabnahme zum Waferrand hin ist darauf zurückzuführen, daß ohne wirksamen Absorber **17** in der Wafermitte mehr reaktive Teilchen, im Ausführungsbeispiel Fluorradikale, verbraucht werden als im Randbereich des Wafers. Mit einem wirksamen Absorber **17** aus Silizium oder Graphit wird die Konzentration der Fluorradikale im Randbereich gesenkt, da der Absorber **17** einen gewissen Anteil absorbiert und in Ätzreaktionen verbraucht. Die Ätzrate auf dem Wafer **9** nimmt also ab.

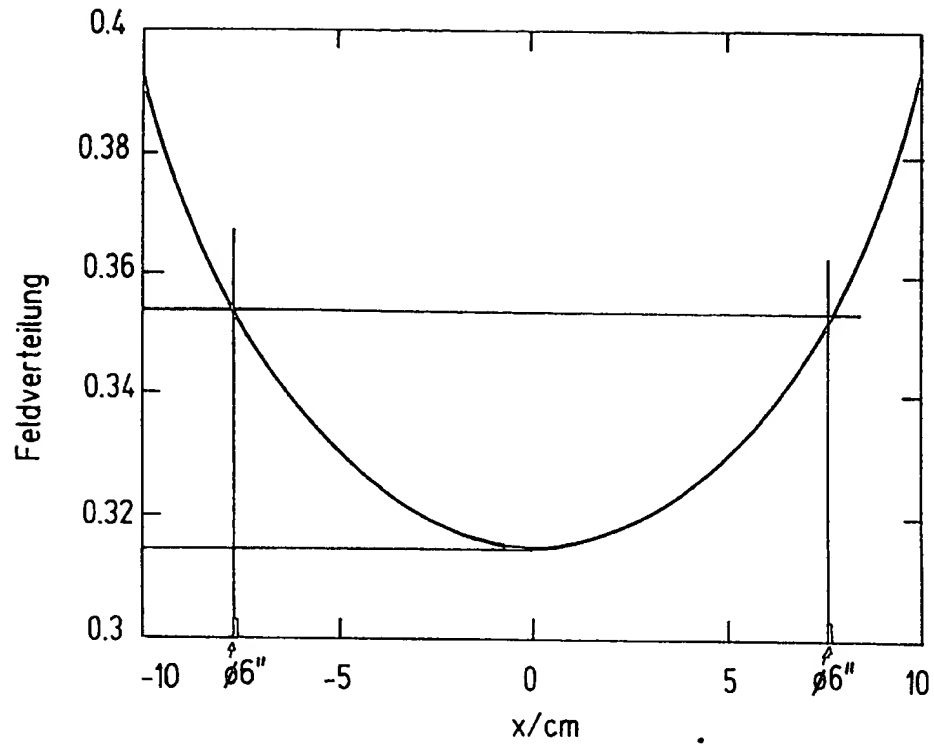
Selbstverständlich sind auch andere Materialien denkbar, die reaktive Teilchen abfangen, wie z. B. Polymere.

#### Patentansprüche

1. Vorrichtung (1) zum anisotropen Ätzen eines Substrats (9) mittels eines Plasmas (8), mit einer Plasmaquelle zum Generieren eines hochfrequenten elektromagnetischen Wechselfeldes, einem Reaktor (2) zum Erzeugen eines Plasmas (8) aus reaktiven Teilchen durch Einwirkung des hochfrequenten elektromagnetischen Wechselfeldes auf ein Reaktivgas oder Reaktivgasgemisch und einer Substratelektrode (10) zum Beschleunigen des im Plasma (8) enthaltenen Ionenstroms in Richtung auf das Substrat (9), wobei zwischen Plasmaquelle und Substrat (9) eine als Lochblende ausgebildete Apertur (13) angeordnet ist, dadurch gekennzeichnet, daß der Apertur (13) mindestens eine wirksame Oberfläche zur Elektronen-/Ionen-Rekombination zugeordnet ist, wobei die wirksame Oberfläche als etwa zylindrischer Aufsatz (16) auf der Apertur ausgebildet ist, und der Durchmesser der Apertur (13) größer als der Durchmesser des Substrats (9) ist.
2. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Lochblende (14) und/oder der Aufsatz (16) aus Metall bestehen.
3. Vorrichtung nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß das Metall fluorbeständig ist.
4. Vorrichtung nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß das Metall Aluminium ist.
5. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß sie einen um das Substrat (9) angeordneten Absorber (17) für reaktive Teilchen des Plasmas (8) aufweist.
6. Vorrichtung nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß der Absorber (17) aus Silizium, Quarz, Kunststoff und/oder Graphit besteht.

Hierzu 3 Seite(n) Zeichnungen

Fig. 1



Waferdurchmesser

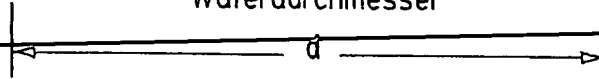


Fig. 2

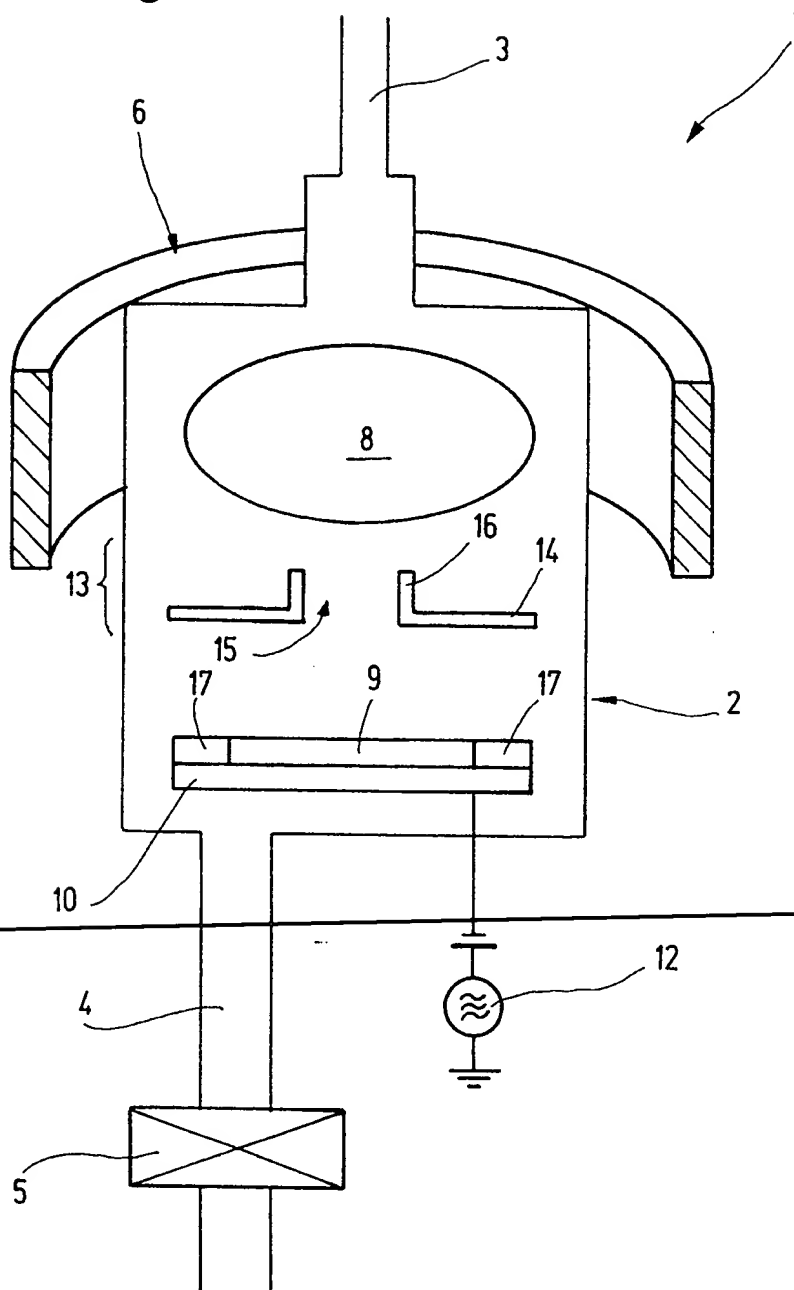


Fig. 3

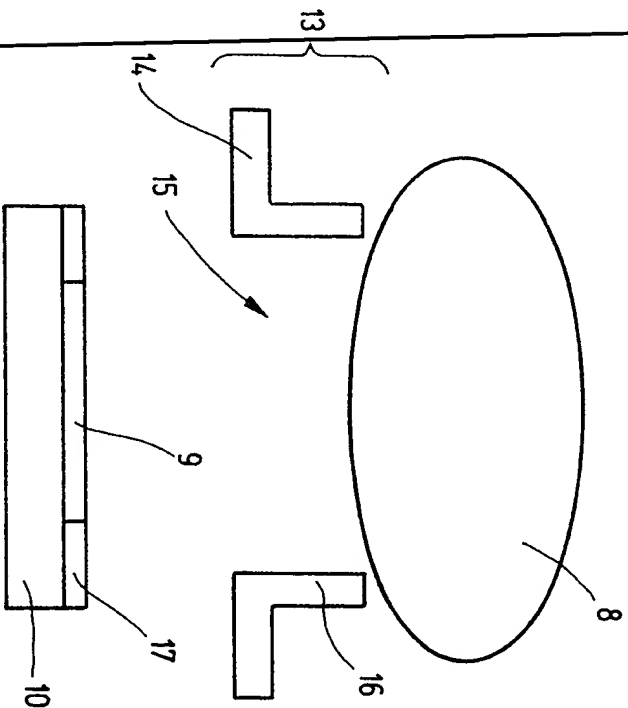


Fig. 4

